

**Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava**

číslo 2, rok 2012, ročník XII, řada stavební

článek č. 11

**Lukáš ĎURIŠ<sup>1</sup>, Josef ALDORF<sup>2</sup>, Karel VOJTASÍK<sup>3</sup>****CHOVÁNÍ DEFINITIVNÍHO OSTĚNÍ PŘI EXTRÉMNĚ NÍZKÝCH TEPLOTÁCH****FINAL LINING BEHAVIOUR IN EXTREMELY LOW TEMPERATURES****Abstrakt**

Návrh definitivního ostění ražených tunelů je složitý úkol. Statická činnost definitivního tunelového ostění je podmíněna interakcí s okolním horninovým masivem. Hodnota jeho zatížení je závislá na geotechnických podmínkách, primárním ostění, tvaru a velikosti výrubu, způsobu výstavby a také na vývoji a rozložení teplot v ostění, které jsou ovlivňovány klimatickými podmínkami. Článek se zabývá stavem napjatosti v definitivním tunelovém ostění, které je indukováno kolísáním teplot ovzduší na vnitřním líci ostění tunelu a konstantní teplotou uvnitř horninového masivu. Problém je řešen s využitím záznamů teplot ovzduší, teplotních stavů na vnitřním a vnějším líci tunelového ostění a uvnitř horninového masivu, které byly naměřeny na dálničním tunelu Klimkovice. Naměřené teploty jsou analyzovány a uplatněny v MKP modelu tunelového ostění, kterým jsou teplotní stav a jeho změny transponovány na hodnoty napětí.

**Klíčová slova**

Definitivní ostění, teploty, monitoring.

**Abstract**

Design of a tunnel lining is complex task. The tunnel lining structure works in close interaction with the surrounding rock mass. The value of the load depends on geotechnical circumstances, primary lining, shape and size of opening, construction technology and as well on the temperature distribution in a lining that is determined by climatic conditions. The article deals with the temperatures in the tunnel lining that are brought about by air temperature changes in tunnel space and a constant temperature inside the rock mass. This problem is solved making use of temperature records in tunnel, on the inner and outer surface of the tunnel lining and in rock mass measured at a motorway Tunnel Klimkovice. These records are analyzed and submit to FE model of the tunnel lining so that the lining temperature state is converted for a lining stress state.

**Keywords**

Secondary lining, temperature, monitoring.

<sup>1</sup> Ing. Lukáš Ďuriš, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: [lukas.duris@vsb.cz](mailto:lukas.duris@vsb.cz).

<sup>2</sup> Prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 944, e-mail: [josef.aldorf@vsb.cz](mailto:josef.aldorf@vsb.cz).

<sup>3</sup> Doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 948, e-mail: [karel.vojtasik@vsb.cz](mailto:karel.vojtasik@vsb.cz).

## 1 ÚVOD

Návrh ostění dopravních tunelů obsahuje řadu požadavků, které ostění musí plnit po celou dobu životnosti tunelu. Každé přerušení dopravy má vždy dalekosáhlé společensko-ekonomické dopady. Řada těchto požadavků, například ukončení vývoje zatížení a zajištění stability horninového masivu tunelovým ostěním, jsou naplněny po úspěšném dokončení výstavby a předání tunelu do provozu. Existují zde některé faktory, které z krátkodobého pohledu mají jen malou váhu, ale protože se jejich vliv postupně načítá, v dlouhodobém časovém horizontu mohou významně ovlivňovat životnost díla. Reprezentantem těchto činitelů jsou periodicky se opakující napětové změny v tunelových ostěních způsobené kolísáním teplot v tunelech. V zemích, jako je Česká republika, se čtyřmi ročními obdobími, které charakterizují rozdílné teploty a rovněž i kolísání teplot během dne, tento jev nelze opominout a musí být zahrnut v návrhu při posouzení životnosti tunelových ostění.

Příspěvek prezentuje výsledky měření na ostění tunelu v Klimkovicích. Pro účely modelové analýzy MKP teplotních vlivů byla použita data ze zimních období s extrémně nízkými teplotami. Modelem MKP bylo stanoveno zatížení ostění od teplotních vlivů. Z výsledků výpočtů na matematickém modelu MKP a dat získaných měřeními na tunelovém ostění byly následně odvozeny a formulovány doporučení pro návrh a posouzení vlivu změn teplot na stav napětí v tunelovém ostění. Doporučení mohou přispět k návrhům nových konstrukčních řešení tunelových ostění, zabránit vzniku poruch a zkrácení doby životnosti ostění a dále vést k úsporám přímých nákladů za opravy a nepřímým ztrátám z příčin výluk provozu na dopravních tunelech [2]. Monitoringu tunelových ostění a sledování teplot se věnují práce [5,6,7,8,9].

## 2 ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

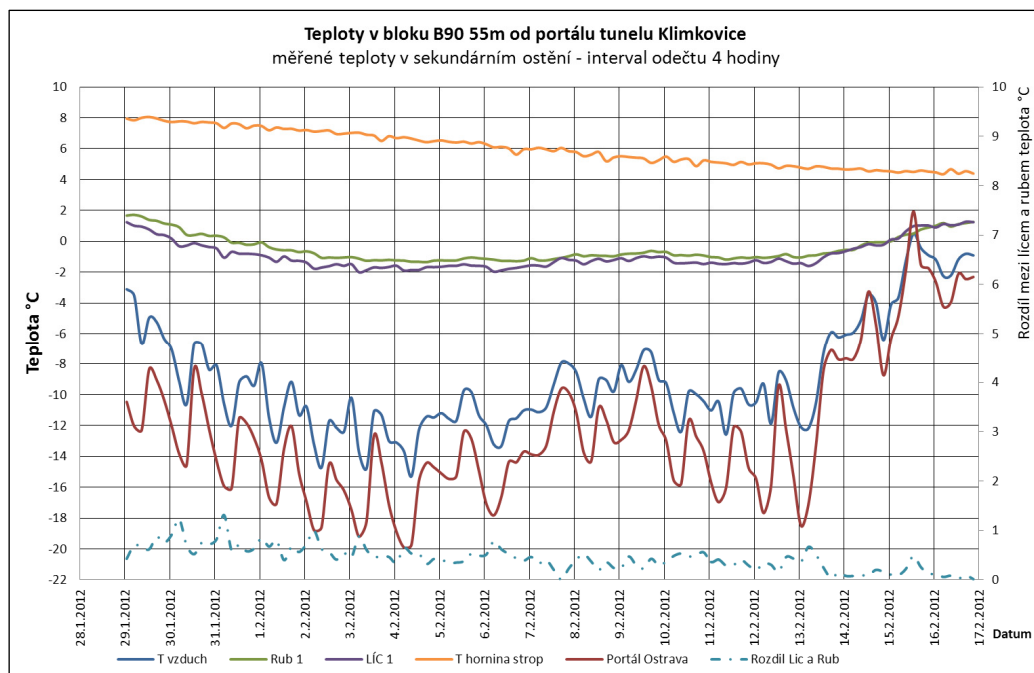
Návrh tunelového ostění je vždy složitý, vzhledem k velkému množství vlivů (zatěžovacích stavů a jejich kombinací), působících na jeho konstrukci. Jedním z těchto vlivů jsou změny teplot, které odráží klimatické podmínky vně tunelu. Za účelem sledování teplotního stavu je ostění na nově budovaných tunelových stavbách osazeno měřicími čidly, která umožňují sledovat změny stavu teploty. Jedním z tunelů, který byl vybaven měřicími čidly je tunel Klimkovice. V průběhu jeho výstavby byla instalována měřidla teploty do horninového masivu a sekundárního ostění, včetně strunových snímačů měření deformací. Snímače byly osazovány ve dvou tunelových pásech – měřicích profilech. V každém profilu bylo použito 12 kusů těchto snímačů. Snímače byly rozmístěny do třech poloh (označeny 1, 2 a 3) a v každé poloze byly osazeny k hornímu a spodnímu okraji výztuže, ve směru radiálním a tangenciálním. Bližší informace v [1,3,4]. Na každém měřicím profilu bylo osazeno také čidlo pro měření teploty vzduchu v tunelu. Systém měření je provozován v automatickém režimu, odečet a sběr naměřených dat probíhá se čtyřhodinovou periodou.

Příspěvek vyhodnocuje stav s nejnižšími teplotami naměřenými v tunelu od počátku jeho uvedení provozu v roce 2008. Vzhledem k relativně krátkému období provozu (čtyři roky) nelze brát dosažené výsledky jako definitivně platné a potvrzené. Sledování jednotlivých období ukazuje na určitý trend a zejména vliv vnějších teplot na ostění. Největší vliv na tunelové ostění má zimní období, kdy dochází k poklesu teplot pod bod mrazu a ke smršťení ostění. V předchozích letech zimní teploty byly zaznamenány jen jako mírné, takže teploty příliš významně neklesly pod bod mrazu kromě období 1/2010 kdy byly zaznamenány teploty nižší než  $-10^{\circ}\text{C}$ . Tato nízká teplota trvala pouze krátce a pak následně docházelo opět k oteplování. Zřetelnější výsledky přinesla zima (2/2012) kdy byly zaznamenány dlouhodobě nízké teploty. V delším časovém úseku trvaly mrazy pod  $-10^{\circ}\text{C}$  (měřeno v tunelu). Podle údajů z venkovních měřidel dosahovaly teploty vzduchu až  $-20^{\circ}\text{C}$ . Tyto nízké teploty přetrvávaly až 20 dní. Tuto situaci lze považovat za extrémní. Kromě vyhodnocení vnitřních teplot v tunelu byly k dispozici i měření z provozu a řízení tunelů. Tato měření sledují např. teploty na portálech, ale i uvnitř tunelu, nebo rychlosti proudění vzduchu. Instalovaný monitoring sleduje pouze dva vybrané úseky vzdálené 55 m (B90) a 140m (B78) od ostravského portálu. Ve sledovaném období byly zaznamenány extrémně nízké teploty od 29. 1. do 16. 2. Nejnižší naměřena teplota byla  $-15,3^{\circ}\text{C}$ . Průměrná teplota se ve sledovaném období pohybovala kolem  $-9^{\circ}\text{C}$ .

Konkrétní hodnoty naměřených teplot ve sledovaném úseku jsou uvedeny v tabulce č. 1. Všechny hodnoty jsou uvedeny ve stupních Celsia. Hodnoty označené v tabulce jako „Max“ je maximální naměřená hodnota, „Min“ je minimální hodnota. Průměrnou teplotu nebo průměrný rozdíl teplot označuje „Průměr“. I zde se potvrdil trend, který naznačovala předchozí měření, a to že ostění není ochlazováno na teplotu vzduchu a je zde patrná časová prodleva. Zejména rozdíly teplot mezi rubem a lícem jsou velice malé (do 2°C). V průměru se tyto rozdíly pohybují kolem 0,5°C. Ve spodní části klenby nad vozovkou jsou rozdíly dvojnásobně větší. Což potvrdily i výsledky z minulých měření [1,2].

Tabulka č. 1 – Extrémy teplot a průměry teplot na bloku B 90 ve sledovaném období

	Vzduch	Rub1	Lic1	Rozdíl1	Rub 2	Lic 2	Rozdíl2	Rub 3	Lic 3	Rozdíl3	Horn.
Max	0,48	1,71	1,27	1,31	1,74	1,33	1,56	2,50	1,31	2,00	8,06
Min	-15,30	-1,35	-2,01	0,01	-1,14	-1,93	0,00	-0,41	-1,73	0,00	4,35
Průměr	-8,96	-0,50	-0,91	0,44	-0,32	-0,92	0,62	0,32	-0,73	1,06	5,99

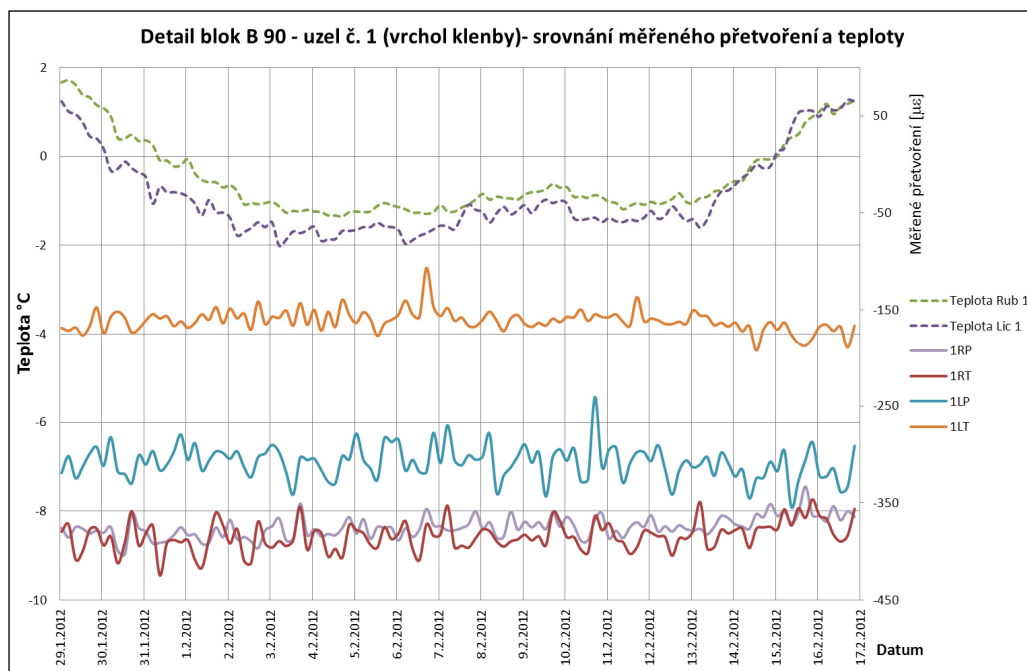


Obr. 1: Průběhů teplot ve vrcholu klenby, blok B90

Na obrázku č. 1 je zaznamenán detail sledovaného období pro vrchol klenby. Do tohoto detailu měření v tunelu byly zaznamenány i měření teploty na ostravském portálu. Vzdálenost toho to profilu je asi 55 m od portálu a je vidět, že teploty vzduchu venku jsou až o pět stupňů nižší než vnitřní a to zejména v brzkých ranních hodinách (doba odečtu je 5:00). V odpoledních hodinách jsou rozdíly menší. Průběh teplot venku odpovídá průběhu uvnitř, tzn. při poklesu venkovní teploty, klesá i teplota vnitřní. Vnitřní teploty dosahují svého minima s mírným zpožděním cca čtyři hodiny. Nejnižší teplota v tunelu byla naměřena obvykle kolem devíti hodin ráno a teplota v ostění vždy reaguje velmi pomalu a se zpožděním. Při postupném ochlazování dochází k nárůstu rozdílu mezi rubem a lícem a při oteplování jsou rozdíly minimální. Největší rozdíl byl naměřen 2°C (viz tab. č. 1). Denní rozdíly teploty vzduchu mohou být až 8°C. Definitivní ostění na tyto rozdíly reaguje, ale velmi nepatrně. Teplota okolního masívu (měřena cca 1 m od primáru) také reaguje na změnu

venkovní teploty a reakce horniny je se zpožděním cca 10 dnů. Při obvyklých teplotách se teplota v masivu hodně blíží teplotě sekundárního ostění.

Současně s měřením teplot v integrovaném snímači je odečítáno i přetvoření definitivního ostění. Tenzometry jsou rozmístěny jak v podélném tak tangenciálním směru v každém měřicím uzlu. Záznam tohoto měření je uveden na obrázku č. 2. Jsou zde srovnávány průběhy teplot v ostění a přetvoření ve vrcholu klenby tunelu. Záznamy na rubové straně ostění jsou větší než na lici a to jak v podélném tak příčném směru. Na lici straně jsou výrazně nižší přetvoření v příčném (tangenciálním) směru než v podélném směru. Reakce na krátkodobou změnu teploty jsou zanedbatelné. Při vyhodnocení všech třech měřicích uzlů vyplývá, že přetvoření je největší ve stření části klenby.



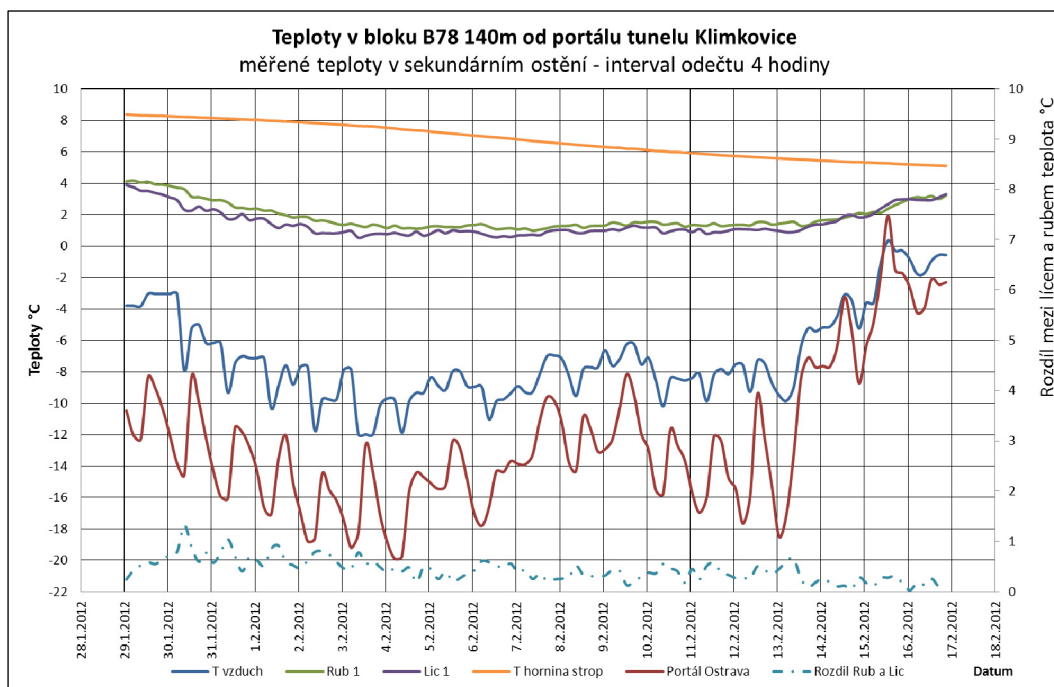
Obr. 2: Srovnání měřeného přetvoření a teploty

V druhém sledovaném profilu (B78), který je vzdálenější od portálu (140m), nejsou ve výsledcích větší rozdíly. Minimální naměřená teplota vzduchu je -12°C. Z průběhu teplot vyplývá, že na tomto profilu je teplota vzduchu v průměru o jeden stupeň vyšší, než na profilu B90 blíže portálu. Konkrétní hodnoty naměřených teplot ve sledovaném úseku jsou uvedeny v tabulce č. 2. Všechny hodnoty jsou uvedeny ve stupních Celsia. Je zde uvedena maximální naměřená hodnota (Max), minimální hodnota (Min). Průměr označuje průměrnou teplotu nebo průměrný rozdíl teplot. Průběh teplot je zaznamenán na obrázku č. 3.

Tabulka č. 2 – Extrémy teplot a průměry teplot na bloku B 78 ve sledovaném období

	Vzduch	Rub1	Lic1	Rozdíl1	Rub 2	Lic 2	Rozdíl2	Rub 3	Lic 3	Rozdíl3	Hor.
Max	0,34	4,16	3,88	1,32	4,04	3,47	1,23	5,14	3,34	1,98	8,37
Min	-11,98	0,98	0,52	0,03	0,87	0,39	0,00	1,92	0,67	0,06	5,10
Průměr	-7,19	1,85	1,44	0,44	1,76	1,28	0,51	2,76	1,55	1,21	6,77

Na obrázku č. 3 pro vrchol klenby tunelu je možno vidět větší rozdíly oproti teplotám na portále. Rozdíly jsou až 8°C. Rozdíly mezi rubem a lícem jsou opět velice malé (do 1°C). Při klesající teplotě jsou tyto rozdíly větší. Toto je základní rozdíl mezi německou drážní směrnicí (DS 853), která uvažuje rozdíl mezi rubem a lícem 10°C, při vzdálenosti do 200m od portálu. Předpokládaných -15°C v ostění uvnitř tunelu dle směrnice nebylo nikdy dosaženo, byť byly naměřeny teploty nižší. Přesto rozdíly mezi rubem a lícem jsou velice malé a potvrzují to i dosavadní výsledky měření.



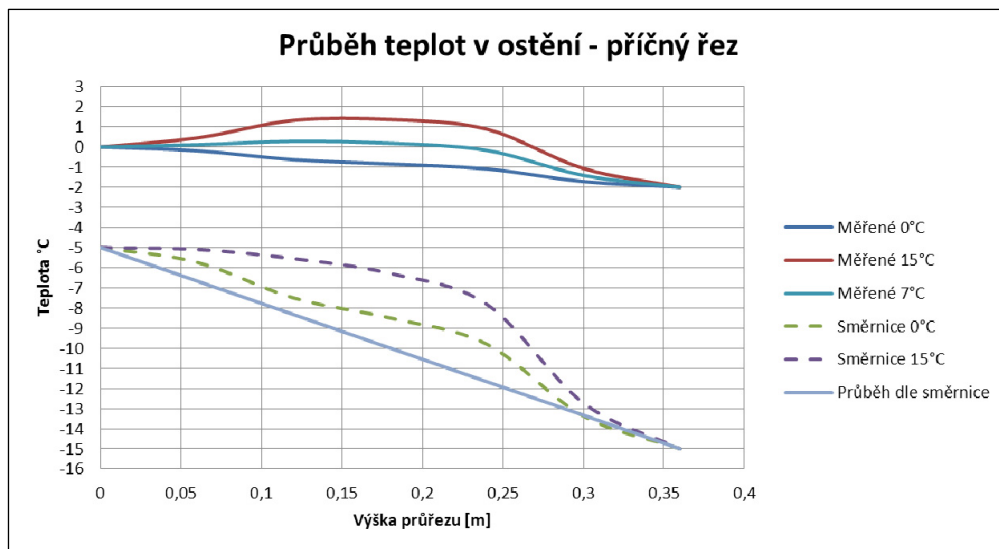
Obr. 3: Průběh teplot ve vrcholu klenby, blok B78

Z výsledků měření teplot je patrné, že teplota uvnitř tunelu ovlivňuje definitivní ostění, nicméně nikdy nedošlo k ochlazení líce výztuže na teplotu vzduchu. Teplota vzduchu je měřená ve vrcholu tunelu, tedy v nejteplejším místě a snímač je vzdálen od líce jen několik centimetrů a přesto jsou rozdíly obou teplot okolo 10°C. Největší podíl na tomto chování má zřejmě teplota okolního masívu. Toto platí ovšem pouze při ochlazování, kdy se ostění nestihne dostatečně rychle ochladit s klesající rychlostí teploty vzduchu. Naopak při oteplování může být teplota vzduchu vyšší než teplota ostění.

### 3 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ V NUMERICKÉM MODELU

Při výpočtu vlivu těchto teplot bylo využito programového systému CESAR – LCPC, 2D modul. Modelování bylo prováděno pomocí metody konečných prvků na osově symetrickém modelu ostění tunelu Klimkovice. Do geometrie modelu byla zahrnuta i protiklenba a vozovka. Klenba tunelu byla proměnlivě tloušťky od 36 cm ve vrcholu klenby, v místě napojení na obslužný chodník je šířka klenby 60 cm. Sekundární ostění bylo přesně rozděleno na několik částí. Vzhledem ke srovnání výsledku bylo teplotní zatížení definováno předepsanou teplotou dle normy (směrnice DS 853) a dle výsledků měření. Hodnoty teploty byly zadávány na rub a líc povrchu ostění. Referenční teplota byla volena buď jako běžná teplota +15°C, nebo teplota 0°C. Pro měřené hodnoty se počítalo s předcházející dlouhodobou teplotou masívu a to +7 °C. Systém neumožňuje zadávat proměnné teploty v čase, tak jak tomu ve skutečnosti je, kdy se teploty v tunelu neustále mění během 24 hodin v závislosti na venkovní teplotě (den a noc). Pro zatížení byly použity konstantní hodnoty a výpočet

proběhnul ve 24 krocích s intervalem 3600 s. Během této doby se teploty v průřezu ustavily v závislosti na zadaných okrajových hodnotách, viz obrázek č. 4. Pro měřené hodnoty se maximální teplota zatížení líc sekundárního ostění stanovila na  $-2^{\circ}\text{C}$  a rub na  $0^{\circ}\text{C}$ . Pro srovnání se směrnici (DS 853) [10] bylo na lici zatížení  $-15^{\circ}\text{C}$  a na rubu  $-5^{\circ}\text{C}$ . Rozdělení teplot v průřezích je patrné z obr. č. 4. Teplota venkovního vzduchu zde nebyla uvažována. Toto rozdělení teplot v klenbě bylo načteno ze souboru do modelu umožňující výpočet napětí-o-deformačních změn. Při výpočtu napětí se uvažuje s teplotním součinitelem roztažnosti materiálu ( $\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ). Ve výsledcích napětí-o-deformačního stavu se dají vyhodnotit průběhy napětí a deformací v klenbě, ale také průběh vnitřních sil v klenbě (výsledky jsou uvedeny níže).

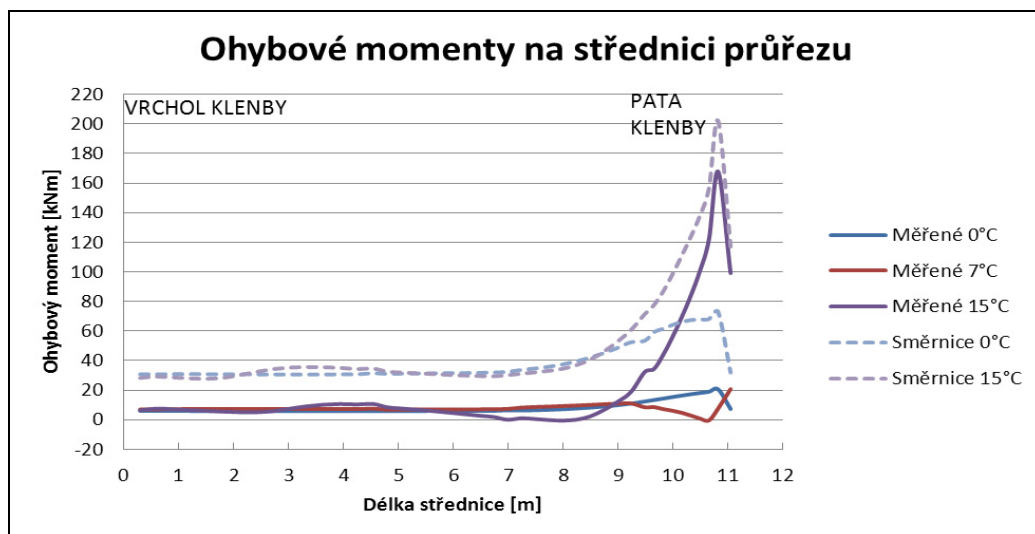


Obr. 4: Průběh teplot v ostění a vliv referenční teploty

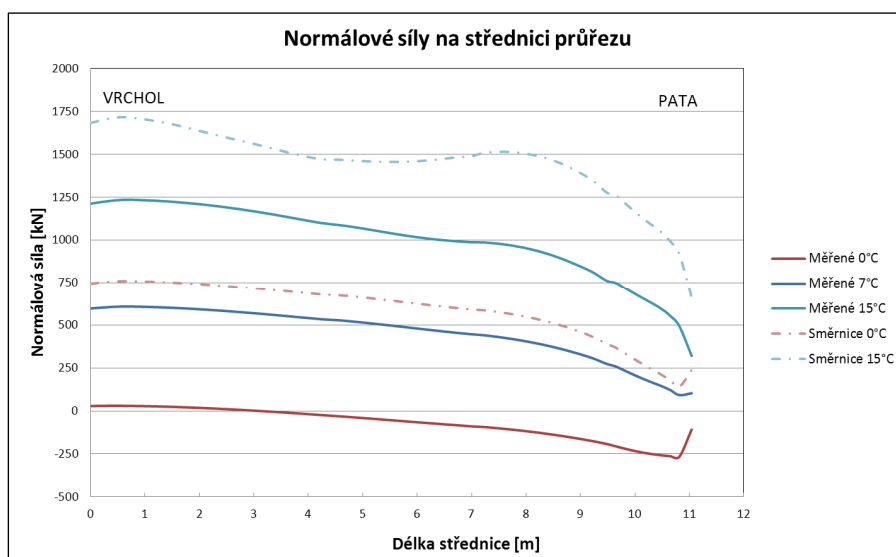
Průběh teplot v ostění je dán výpočtem v síti konečných prvků. Vlastnosti materiálu jsou charakterizovány součinitelem tepelné vodivosti a objemovou tepelnou kapacitou. Ukázalo se, že vliv počáteční referenční teploty je na celkový průběh teplot v ostění poměrně zásadní. Při vysoké referenční teplotě není průběh zcela lineární. U měřených teplot (okrajové teploty vycházející z měření na tunelu) je tento vliv také patrný. Ve skutečnosti, ale teploty neustále kolísají v průběhu dne a noci, a proto tento linearizovaný průběh ne zcela odpovídá realitě.

Na velikosti ohybových momentů (obrázek č. 5) se projevilo rozdílné zatížení průřezu pro měřené hodnoty a hodnot dle směrnice. Při uvažování naměřených hodnot dochází ke snížení ohybových momentů až o 80%. Vliv rozdílné referenční teploty se příliš významně neprojevil. Průběhy normálových sil v ostění jsou uvedeny v obrázku č. 6.

Při výpočtu normálových sil byl opět zohledněn vliv referenční teploty. Na rozdíl od ohybových momentů jsou na průběhu normálových sil vidět rozdíly. Získané výsledky platí pro kombinaci zatěžovacích stavů, ve které se uvažuje vliv teploty a vlastní tíhy klenby. Všechny výsledky normálových sil jsou převážně kladné, to znamená, že průřez je tažený. Při větších rozdílech mezi lícem a rubem dochází k většímu namáhání. U měřených teplot zase platí, že čím vyšší referenční teplota tím je větší zatížení.



Obr. 5: Ohybové momenty v ostění na střednici



Obr. 6: Normálové síly v ostění na střednici

## 4 ZÁVĚR

Měření teplot a poměrných deformací v ostění tunelu Klimkovice jasně prokázalo jejich smysl a jejich potřebu pro exaktní vyhodnocení vlivu periodických změn oteplování a ochlazování tunelového ostění klimatickými jevy.

Získané poznatky rozvíjí a upřesňují pohled na vývoj, rozložení a hodnoty teplotního pole v tunelovém ostění.

Výsledky měření teplot poskytují pro statické řešení ostění hodnoty okrajových podmínek, kterými je definována časová závislost průběhu zatěžování ostění teplotními změnami.

Vystavení tunelového ostění dlouhodobým extrémně nízkým teplotám vnějšího ovzduší přineslo několik nových a zajímavých poznatků. Teploty v tunelovém ostění nedosáhly hodnot teplot vnějšího ovzduší, rozdíl činil až 10°C. Maximální rozdíl teplot mezi vnějším a vnitřním lícem tunelového ostění nepřekročil 2°C.

Výsledky výpočtů na matematickém modelu vykazují rozdíly při zatížení skutečnými hodnotami z měření a hodnotami danými směrnici DS 853. Vnitřní síly indukované změnami teploty – ochlazením jsou malé a vyvolávají tahové namáhání průřezu ostění. Průběh teplot v průřezu ostění je ovlivňován počáteční (referenční) teplotou, což má vliv na výsledky vnitřních sil.

## PODĚKOVÁNÍ

Práce byla podporována z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## LITERATURA

- [1] ĎURIŠ, L., ALDORF, J. Evaluation of the Klimkovice Tunnel secondary lining temperature measurement results. In *Transport and City Tunnels - Underground construction Prague 2010*. Prague : Czech Tunelling Association ITA/AITES. 2010, s. 587-593
- [2] ALDORF, J., ĎURIŠ, L., HRUBEŠOVÁ, E., VOJTASÍK, K., GÉRYK, J. Změny a sledování teplot v dopravních tunelech. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*, 2008, roč. 8, č. 1, s. 229-234. ISBN 1213-1962
- [3] ŠOUREK, P., VÍTEK, J., ALDORF, J., ĎURIŠ, L. Experimentální měření definitivních tunelových ostění. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, ISSN 1213-3116, 2009, roč. 9, č. 5, s. 74-79.
- [4] ĎURIŠ, L., ALDORF, J., HRUBEŠOVÁ, E., VOJTASÍK, K., GÉRYK, J. Vliv teplotních změn na napjatost v ostění podzemních děl. In *Geotechnika 2008 Geotechnics, konstrukcie, technológia a monitoring - zborník 12. medzinárodnej konferencie*. Stupava (Slovakia): ORGWARE. 2008, s. 349-354.
- [5] LI, Chuan, Yong-Gui ZHAO, Hao LIU, Zhou WAN, Chen ZHANG a Ning RONG. Monitoring second lining of tunnel with mounted fibre Bragg grating strain sensors. *Automation in Construction*, 2008, roč. 17, č. 5, s. 641-644. ISSN 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.11.001.
- [6] PURKISS, J.A. Steel fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1984, roč. 6, č. 3, s. 179-184. ISSN 02625075. DOI: 10.1016/0262-5075(84)90006-X.
- [7] EL-NAHHAS, F. Construction monitoring of urban tunnels and subway stations. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1992, roč. 7, č. 4, s. 425-439. ISSN 08867798. DOI: 10.1016/0886-7798(92)90073-Q.
- [8] CHUNG, Hyung-Sik, Byung-Sik CHUN, Byung-Hong KIM a Yong-Jae LEE. Measurement and analysis of long-term behaviour of Seoul metro tunnels using the Automatic Tunnel Monitoring Systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006, roč. 21, 3-4, s. 316-317. ISSN 08867798. DOI: 10.1016/j.tust.2005.12.032
- [9] TANG, Guozhang a XinHua WANG. Effect of temperature control on a tunnel in permafrost. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007, roč. 22, č. 4, s. 483-488. ISSN 08867798. DOI: 10.1016/j.tust.2005.11.007.
- [10] Deutsche Bahn Richtlinie 853. *Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten*. Platná od 1. 6. 2002

## Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Dr. Ing. Jan Pruška, Katedra geotechniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.

Doc. Ing. Vladislav Horák, CSc., Ústav geotechniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.